

Identification of Nonlinear Site Responses of Vertical Motions Using Strong Motion Records Observed at the Ground Surface

*Toshimi Satoh¹

1. Institute of Technology, Shimizu Corporation

強震時には地盤が非線形化し、強震記録の水平動にはその影響がみられることは多数報告されている。上下動については、強震記録からその影響が顕著にみられることを示した研究は少ない。本研究では、以下のよう
に、KiK-net強震記録に基づき、上下動の地盤増幅特性の非線形性の有無が、地表での上下動の観測加速度波形
を積分した速度波形の形状で識別できることを示している。

1997～2018年のKiK-net強震記録から、地表での3成分合成の最大加速度が 300cm/s^2 以上のデータを強震動
として選択した。加速度波形をプリイベントメモリの平均値で零線補正後、時間領域で積分して速度波形を算
出した。その結果、振幅が大きい場合には直線状のトレンドが生じる場合が多かったが、一部の上下動の速度
波形には、図1に示すように負の方向にステップ状に一定になる、あるいは、負の方向に直線状のトレンドが
生じた後ほぼ一定となるデータが存在していた。ほぼ一定となる速度の絶対値を V_{non} と呼ぶ。図1の8ケタの
数字は地震の発生年であり、TTRH02(日野)のように V_{non} が生じた後にやや負方向に緩やか勾配もつ場合
や、正方向に緩やか勾配もつ場合もあったが、多くは一定となっている。図1は、地殻内地震で $V_{\text{non}} \geq$
 2.5cm/s となった6つの上下動の速度波形とモデルを、下から V_{non} の大きな順に示したものである。302個の
強震動のうち、 $V_{\text{non}} \geq 1.0\text{cm/s}$ となった上下動は35個であった。 V_{non} が最大のデータは2011年東北地方太平
洋沖地震のTCGH16(芳賀)、2番目は図1に示した2018年北海道胆振東部地震のIBUH01(追分)、3番目は図1に
示した2000年鳥取県西部地震のTTRH02であった。いずれも、震度7相当である。図1の2016年熊本地震本震
と前震のKMMH16(益城)は、最大速度が大きいいため、この図のみからは V_{non} が明瞭にはみえないが、地殻内
地震の中では V_{non} が5番目、6番目に大きかった。

$V_{\text{non}} \geq 1.0\text{cm/s}$ となった強震動の地中に対する地表のスペクトル比と、弱震動のスペクトル比の平均値と平均
±標準偏差の比較を行った。図2には、例として2018年北海道胆振東部地震のIBUH01と2016年熊本地震本震
のKMMH16を示す。強震動の水平動のスペクトル比 H/H_g のみならず、上下動のスペクトル比 V/V_g も弱震動と
は異なっており、上下動の地盤増幅特性にも非線形性があることがわかる。 $V_{\text{non}} \geq 1.0\text{cm/s}$ となった強震動に
は、同様の特徴がみられた。したがって、地表の上下動の速度波形の形状から、上下動の地盤増幅特性の非線
形性の有無を識別できると考えられる。

図2の、上下動のピーク周波数の1/2の周波数付近に水平動のピーク周波数がある。また、 $V_{\text{non}} \geq 1.0\text{cm/s}$ と
なった強震動には、水平動と上下動の加速度波形の粒子軌跡が、上に凸となる特徴がみられた。さら
に、 V_{non} が大きい上下動の速度波形には、正方向に鋭く振幅の大きなピークを、負方向にやや幅の広いピーク
をもつ特徴がみられた。これらの特徴は、既往の研究(森尾・他, 2017)の解析に基づく、負のダイレイタン
シー(体積収縮)の特徴である。また、不飽和地盤では、繰返し载荷により体積収縮が発生し、水平加振で水平
動の2倍の周波数で上下動が発生することが実験でも指摘されており(例えば、大嶋・渡辺, 1994)、この弾塑
性現象が大振幅時に発生した可能性がある。ただし、 V_{non} が生じる速度波形の形状に関する物理的・力学的な
証明は今後の課題である。 $V_{\text{non}} \geq 1.0\text{cm/s}$ となった強震動の V/V_g は、極軟弱層がある場合を除き、10Hz程度
以下では弱震動より大きい場合が多く、非線形化することで上下動が増幅することがわかった。 V/V_g の1番目
のピークでの弱震動に対する強震動の比は、平均3.7倍であった。また、図2に示したように、上下動の V/V_g
のピーク周波数の1/2の周波数付近に存在する水平動のピークレベルも、弱震動より大きい場合が多かった。こ
のように、ダイレイタンシーが生ずる場合には、水平動も周波数帯域によっては、弱震動より地盤増幅が大き
くなる場合があった。

佐藤(2015)では、2011年東北地方太平洋沖地震のTCGH16の地盤増幅特性を弱震動のものに置き換えた場合、震度は7相当にはならないことを指摘している。森尾・他(2017)ではTCGH16の粒子軌跡から、ダイレイタンスの影響の可能性を指摘している。本研究の結果からも、TCGH16の震度7相当にはダイレイタンスによる非線形地盤増幅が寄与したと考えられる。図2のKMMH16では、 V/V_B のピーク周波数の1/2の周波数である0.8HzにEW成分のピークがあり、この周波数は $V_{non} \geq 1.0 \text{ cm/s}$ となったデータのうちで最も低周波であり、建物被害に寄与した可能性がある。中澤・他(2018)は、益城町での被害が大きかった領域は地下水位が浅く、KMMH16周辺は地下水位が深いことを示している。被害の大きかった地域では、地下水位の違いの影響を受けた浅部の黒ボク(火山灰質粘性土)のダイレイタンスによる非線形地盤増幅が大きな地震動に寄与した可能性がある。

謝辞：本研究ではKiK-net強震記録とその地盤構造、気象庁の一元化震源情報を用いました。記して感謝致します。

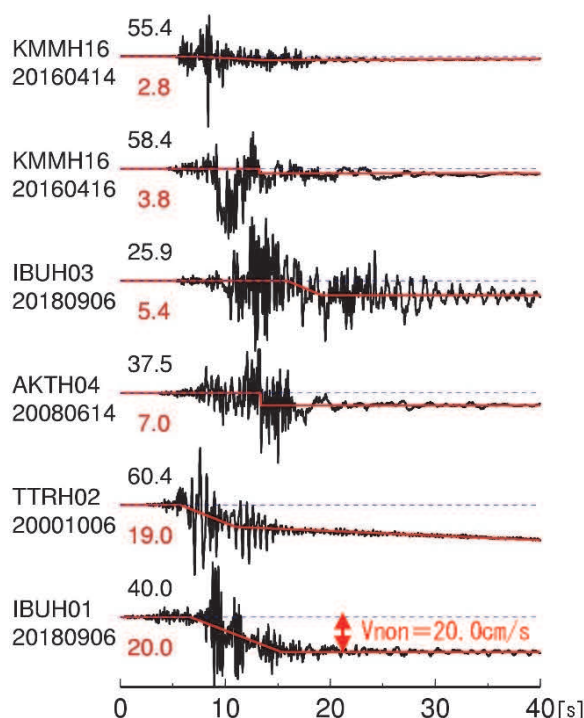


図1 地殻内地震で $V_{non} \geq 2.5 \text{ cm/s}$ の地表での上下動の速度波形(黒)とモデル(赤). 赤の数字が V_{non} [cm/s], 黒の数字が最大速度 [cm/s].

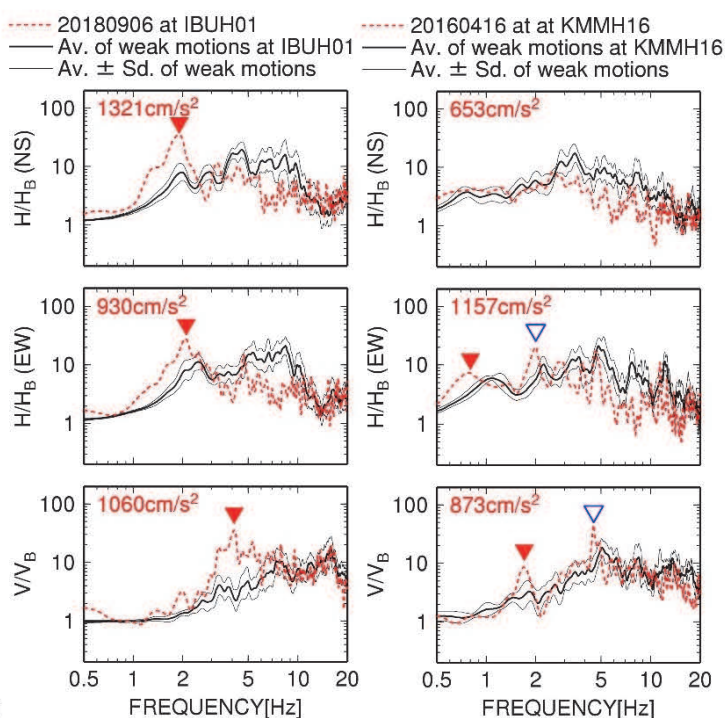


図2 強震動と弱震動の地中に対する地表のスペクトル比の比較 (▼, ▼は、上下動のピークとその周波数の1/2の周波数の水平動の1番目, 2番目のピーク)